

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Агафонов Александр Викторович  
Должность: директор филиала  
Дата подписания: 31.03.2022 16:02:42  
Уникальный программный ключ:  
2539477a8ecf706dc9c1164bc411eb6d5c4ab06

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ЧЕБОКСАРСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)  
МОСКОВСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Кафедра  
Транспортно-технологические машины**



**Математическое моделирование  
процессов в машиностроении**

(наименование дисциплины)

**Методические указания по выполнению  
расчетно-графической работы**

Направление подготовки	<b><u>15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств</u></b> (код и наименование направления подготовки)
Направленность (профиль) подготовки	<b><u>Технология машиностроения</u></b> (наименование профиля подготовки)
Квалификация выпускника	<b>бакалавр</b>
Форма обучения	<b>очная, заочная</b>

Чебоксары, 2019

Методические указания разработаны  
в соответствии с требованиями ФГОС ВО  
по направлению подготовки

**15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств**

---

Автор:

Мишин Вячеслав Андреевич

К.т.н., доцент кафедры транспортно-технологических машин

---

*ФИО, ученая степень, ученое звание или должность, наименование кафедры*

Методические указания одобрены на заседании кафедры

транспортно-технологических машин

---

*наименование кафедры*

протокол № 10 от 10.05.2019 года.

## Содержание

	Стр.
Введение .....	4
1.Цель и задачи курсовой работы .....	4
2.Теоретическая часть .....	5
2.1.Понятие о структурной оптимизации системы .....	5
2.2.Математическая модель .....	8
2.3.Пороговая оптимизация .....	13
2.4.Использование обобщенного критерия .....	14
2.5.Анализ ресурсов действующей технологии и выявление приоритета критериев оптимизации .....	15
3.Задание на расчетно-графическую работу .....	18
4.Содержание и порядок выполнения работы .....	19
4.1.Пояснительная записка .....	19
4.2.Построение математической модели .....	20
4.3.Нормирование модели .....	23
4.4.Анализ технико-экономических резервов производства и выявление приоритетности критериев оптимизации . . . . .	27
4.5 Оптимизационные расчеты .....	29
4.5.1.Пороговая оптимизация .....	29
4.5.2.Использование обобщенного критерия оптимизации.....	30
4.6. Выводы .....	31
5. Графическая часть .....	31
Список литературы .....	33
Приложение А. Бланк задания на курсовую работу .....	35
Приложение Б. Пример оформления математической модели . . . . .	36

## **Введение**

Вы приступили к выполнению курсовой работы по дисциплине «Математическое моделирование процессов в машиностроении», и у вас, вполне естественно, возник целый ряд та-ких вопросов, как "с чего начать?", "какова структура работы?", "как ее оформлять?", "какими книгами пользоваться?" и т.д. Ну что ж, начали вы вполне правильно, приступив к изучению настоящих методических указаний, которые помогут ответить на большинство из возникших вопросов.

Однако помогая в преодолении организационных и методиче-ских трудностей, методические рекомендации не подменяют вашего познавательного процесса при выполнении курсовой работы и остав-ляют большой простор для творческой деятельности, не ограничивая ее какими-либо рамками, предполагая активную самостоятельную работу с литературой.

Поэтому, приступая к выполнению курсовой работы, необходи-мо настроиться прежде всего на упорную самостоятельную творче-скую работу, наполненную неизбежными ошибками и тупиковыми си-туациями, выйти из которых вам помогут консультант и ваше упорст-во. Успехов вам!

### **1. Цель и задачи курсовой работы**

Настоящая курсовая работа является частью методически и ор-ганизационно связанного комплекса задач, решаемых в рамках учеб-ного процесса для студентов дневной и заочной форм обучения по следующим направлениям подготовки дипломированных специа-листов:

а также по направлению бакалаврской подготовки 552900 – «Техноло-гия, оборудование и автоматизация машиностроительных произ-водств».

Основной целью курсовой работы является овладение студен-тами методикой системного анализа и приобретение практических навыков в самостоятельном решении следующих задач:

а) системный анализ структуры технологических процессов дей-ствующего производства и выявление резервов повышения его эффек-тивности;

б) определение критериев повышения эффективности дейст-вующего производства и поиск функциональных параметров предпоч-тительности при оптимизации по этим критериям;

в) математическое моделирование технологических процессов для реализации многокритериальной структурной оптимизации на уровне их маршрутного описания;

б) выполнение многокритериальной структурной оптимизации технологических процессов с использованием современных компьютерных средств;

в) использование результатов оптимизации при разработке перспективных (проектных) и рабочих технологических процессов на принципах ресурсосбережения, технического перевооружения действующего производства, создания прогрессивных технологических решений.

Творческое решение перечисленных задач способствует также закреплению теоретических знаний студентов, полученных ими в лекционном курсе по одноименной дисциплине.

## **2. Теоретическая часть**

### **2.1. Понятие о структурной оптимизации системы**

Системный подход к решению сложных технических задач основывается на анализе и синтезе структуры, функции и характеристик рассматриваемого объекта. При этом основой системных исследований является представление этого объекта (изделия, процесса проектирования, технологического процесса и др.) в виде системы, состоящей из множества взаимосвязанных элементов, выступающих как единое целое [1–2].

Все системное рассмотрение осуществляется через призму структуры объекта, под которой понимается совокупность устойчивых отношений между частями целостного объекта. При этом структура представляет собой единство противоположных сторон: расчлененности и целостности. Расчлененность характеризуется следующими признаками:

- а) качественной спецификой частей системы;
- б) количеством частей, на которое расчленяется система.

Целостность же определяется организацией системы в виде совокупности связей между вышеназванными частями. Причем связи могут быть как физически наполненными (энергетическими, информационными и др.), так и абстрактными, в виде отношений при описании топологии, системы классификации и др.

Рассмотрим в качестве примера структуру технологического процесса. Определяя его расчлененность такой качественной спецификой как требование законченности выполнения производственного процесса на рабочем месте, приходим к представлению отдельных его частей в виде множества

технологических операций. Целостность системы в данном случае определяется упорядоченным расположением операций как во времени (определен порядок их следования друг за другом), так и в пространстве (определены рабочие места, на которых выполняются операции). Такое представление структуры технологического процесса относится к уровню маршрутного описания. Подробно ознакомиться с другими уровнями описания структуры технологического процесса можно в соответствующей литературе /3/, а с определениями и содержанием структурных элементов – в /4-5/.

При выполнении проектных работ синтез и оптимизация структуры создаваемой системы являются определяющими по отношению к оптимизации функциональных параметров по двум причинам:

во-первых, формирование структуры является начальным проектным этапом по отношению к расчету функциональных параметров<sup>1</sup>;

во-вторых, ошибочность полученной структуры уже не сможет быть исправлена никакой функциональной оптимизацией.

<sup>1</sup> Если подходить более четко, то реализация этих задач представляет интерактивный взаимосвязанный процесс, который начинается все же с формирования структуры.

Задачу оптимизации можно определить как поиск наилучшего решения  $S_{opt}$  из множества допустимых  $S_D = \{s_j\}$ ,  $j \in [1, n]$  по заданному критерию оптимизации. Если определено множество критериев, то уже имеет место многокритериальная оптимизация. Говоря о структурной оптимизации, следует заметить, что множество  $S_D$  является допустимым с точки зрения функции оптимизируемой системы. На-пример, по отношению к технологическому процессу это говорит о том, что какую бы структуру технологии из множества  $S_D$  мы не выбрали, в любом случае получится годная деталь в соответствии со всеми требованиями ее рабочего чертежа.

В рамках настоящей курсовой работы выполняется структурная оптимизация технологических процессов на уровне их маршрутного описания. Данная задача возникает в силу ряда следующих причин.

Во-первых, при внедрении в производство нового прогрессивно-го технологического оборудования с микропроцессорным управлением встает проблема выбора такого оборудования. Это связано с наличием у него взаимно противоположных свойств – приведенных затрат на его эксплуатацию и технологической возможности (точности, количества координат относительного перемещения заготовки и т.д.), которая определяет степень концентрации технологических операций.

Во-вторых, внедрение альтернативных технологических методов в

совокупности с сопровождающими их технологическими операциями (например, механической подготовкой и ионной очисткой поверхности заготовки перед напылением или ионной имплантацией) требует структурного анализа с целью выбора экономичного решения.

В-третьих, в условиях конверсии возникает задача перераспределения имеющегося производственного оборудования между действующими и внедряемыми технологическими процессами.

Рассматриваемая структурная оптимизационная предусматривает решение трех основных задач:

- построение математической модели,
- выявление приоритетности критериев оптимизации на основе анализа действующей технологии,
- поиск оптимальной структуры.

## 2.2. Математическая модель

Для генерирования вышеназванного допустимого множества решений используются математические модели. В зависимости от условий проектирования (техническое перевооружение производства, создание прогрессивной технологии, технологическая подготовка производства к выпуску нового изделия, конверсия предприятия и др.), вида самого технологического процесса (директивный, перспективный, рабочий, групповой, типовой и т.д.) и рассматриваемого уровня его описания (межцеховой, маршрутный, операционный) используются те или иные методы и модели структурной оптимизации (см. /2/, /6/), которые могут быть и альтернативными по отношению к решаемой задаче.

В качестве математической модели, генерирующей допустимое множество структур технологических процессов, из которых осуществляется оптимизационный выбор, используется сетевой граф  $G=(X,U)$ . Вершинами  $X$  такого графа являются элементы множества возможных вариантов технологических операций, отличающихся концентрацией, используемыми технологическими методами (в том числе при получении исходной заготовки) и оборудованием. Дуги графа  $U$  – это логические связи возможности последовательного выполнения пар технологических операций, соответствующих инцидентным вершинам.

Формирование модели осуществляется путем анализа возможных многовариантных технологических структурных решений, а именно:

- различной концентрации операций;
- различного технологического оборудования выполнения операции;
- различного уровня автоматизации;
- различных технологических методов.

При этом в системном анализе при построении математической модели задействуется система факторов и показателей, представленных набором функциональных параметров технологического процесса (см. табл.1).

В процессе анализа выявляется влияние факторов на конкретные операции базового технологического процесса с последующим достраиванием вершин по результатам данного анализа (см. рис.1).

Таблица 1 Описание факторов, определяющих многовариантность модели



РЕГУЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ НА УРОВНЕ МАРШРУТНОГО ОПИСАНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ УРОВЕНЬ ТЕХНОЛОГИИ	РЕГУЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ НА ОПЕРОННО ОПИС	ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НА УРОВНЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА	
степень автоматизации, степень использования прогрессивных методов обработки, производительность технологического оборудования и др.	степень центра дифференциации чешекций	качества микротвердость, степень наклепа, дисперсность структуры и др.	размер, точность, размерность, поверхность и др.
ОПРЕДЕЛЯЕМАЯ МНОГОВАРИАНТНОСТЬ			
методы обработки, технологическое оборудование	технологические	методы обработки	методы обработки, технологическое оборудование

На рис. 2 показан пример модели, построенной путем анализа возможных многовариантных технологических структурных решений, а именно:

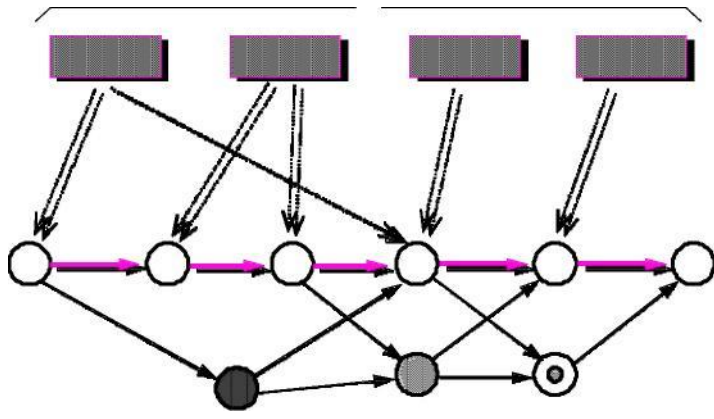
– различной концентрации технологических операций (операция, соответствующая вершине  $x_7$ , включает в себя переходы операций, соответствующих вершинам  $x_2$  и  $x_3$ );

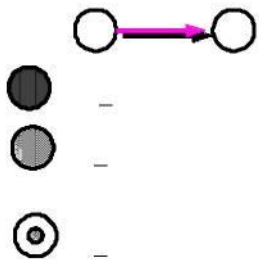
– использования технологического оборудования с различной степенью автоматизации (операции, соответствующие вершинам  $x_7$  и  $x_8$ , выполняются на альтернативных станках<sup>1</sup>, например 16У04П 16Б05АФ1);

<sup>1</sup> Предполагается, что характеристики рассматриваемых станков (мощность, габариты, технологические возможности и др.) соответствуют условиям обработки данной заготовки.

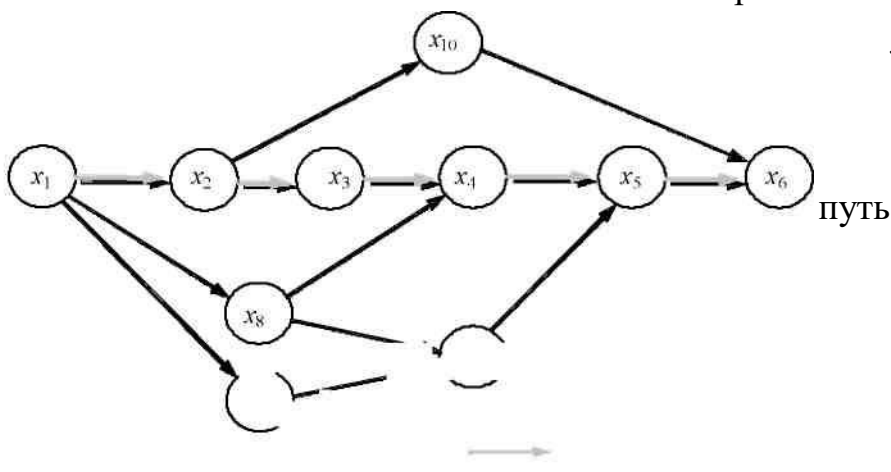
- различных технологических методов (операции, соответствующие вершинам  $x_4$  и  $x_9$ , выполняются альтернативными технологическими методами, например, сверлением и электроэрозионной обработкой).

## АНАЛИЗИРУЕМЫЕ ФАКТОРЫ





– базовый путь;  
 ● – концентрирующая операция;  
 ● – включение прогрессивного технологического оборудования;  
 ⊙ – включение прогрессивного метода обработки



$f \sim \wedge \text{Цш} | X \delta )$   
 $X_1 J^\wedge$   
 ----- „- - базовый путь

Рис. 2

Любой полный путь  $L_j = \{ x_i \}$ ,  $x_i \in X$  на таком графе, соединяющий вершины входа и выхода сети (для рассматриваемого примера – это вершины  $x_1$  и  $x_6$ ), является отображением допустимого варианта структуры технологического процесса.

В отличие от иллюстрирующего примера математическая модель реального технологического процесса представляет из себя граф

30

с общим количеством путей, достигающим порядка 10.

Поставив в соответствие каждой вершине графа  $x_i \in X$  вещественное число  $\varepsilon(x_i)$ , представляющее из себя значение выходного функционального параметра, соответствующего критерию оптимизации (приведенные затраты, штучное время и др.)<sup>1</sup>, можно говорить об оптимальном решении, определяемом соотношением

$$L_{opt} = \min_j \{ L_j \}, \quad (1)$$

где  $L_j$  – длина пути  $L_j$ , определяемая в свою очередь формулой

Данная процедура называется нормированием графа.

$$L_j = \sum_{x_i \in L_j} \varepsilon(x_i), \quad (2)$$

а  $\{L_j\}$  – множество длин всех путей графа<sup>1</sup>.

Решение задачи в таком однокритериальном варианте не представляет трудности. Для этого достаточно использовать любой из известных алгоритмов поиска критического пути на сетях [7] или алгоритм поиска кратчайшего пути в ориентированном графе. Таким образом, оптимальной структурой обладает тот технологический процесс, который соответствует полному пути, имеющему минимальную (максимальную) длину.

Однако поиск оптимального решения усложняется, когда приходится иметь дело с несколькими противоречивыми критериями, что наиболее вероятно в условиях реального производства. Это могут быть такие основные технико-экономические критерии, как максимальная прибыль и максимальная производительность производства.

В этом случае при нормировании модели вершинам графа  $x_i \in X$  ставится в соответствие не одно, а несколько вещественных чисел  $\{e^k(x_i)\}$ ,  $k \in [0, n]$  ( $n+1$  – количество критериев оптимизации). В этом случае каждому  $k$ -му критерию

оптимизации будет соответствовать своя длина одного и того пути  $L_j$

$$L^k = \mathbf{f} \quad \text{для} \quad x_i \in L_j \quad B^k(x_i), \quad (3)$$

Решение многокритериальных оптимизационных задач осуществляется двумя подходами /2/ - с использованием обобщенного критерия оптимизации, в который сворачиваются все критерии, и так называемой "пороговой оптимизацией".

Здесь и далее имеются в виду полные пути в соответствии с введенным определением.

### 2.3. Пороговая оптимизация

Основу метода пороговой оптимизации составляет построение по основному критерию<sup>1</sup> упорядоченного множества путей графа  $S_D = \{ L_t \}$ , отвечающих следующим требованиям: если  $t$  - это поряд-ковый номер пути, то

(4)

$$L_t^o \leq L_{t+1}^o \quad \text{для} \quad \forall L_t \in S_D.$$

Для поиска путей графа данного множества  $S_D$  следует восполь-зоваться алгоритмом из класса так называемых алгоритмов "поиска  $k$  кратчайших путей". В качестве такого можно рекомендовать алго-

2

ритм АМАСОНТ /8/ , который для данного класса графов на порядок превосходит по времени сходимости известные алгоритмы (например, алгоритм "double sweep" /9/ ).

Второстепенные критерии оптимизации формируют ограниче-ния следующего типа<sup>3</sup>

$$\begin{aligned} L_j^k < \mathcal{L}^k & \quad (\text{ограничение сверху}) \quad \text{или} \\ L_j^k > \mathcal{L}^k & \quad (\text{ограничение снизу}), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\mathcal{L}^k$  - пороговое значение на длину пути по  $k$ -му второстепенному критерию, определяемую выражением (3).

Ниже приводится алгоритм реализации пороговой структурной оптимизации.

**Шаг 1.** Назначить основной  $\varepsilon^0(x_i)$  и второстепенные  $\{\varepsilon^k(x_j)\}$  ( $x_i \in X$ ) критерии оптимизации. Второстепенные критерии не помечены.

<sup>1</sup> Условно номер основного критерия принят равным 0.

<sup>2</sup> В работе изложено описание и математическое обоснование алгоритма, а также результаты вычислительных экспериментов.

<sup>3</sup> Вид ограничения определяется направлением поиска оптимального решения по данному критерию, т.е. стремление к минимальному или максимальному значению.

**Шаг 2.** Назначить (экспертно) для каждого  $k$ -го второстепенного критерия пороговое значение  $L$ .

**Шаг 3.** Положить  $t=1$ .

**Шаг 4.** Рассмотреть путь из множества  $S_D$  под номером  $t$ .

**Шаг 5.** Проверить справедливость выполнения соотношения (5) для каждого второстепенного критерия. Если это имеет место, путь под номером  $t$  из множества  $S_D$  оптимальный, если нет, увеличить  $t$  на 1 и перейти к шагу 4.

Необходимо сделать два замечания.

Во-первых, при завышенных требованиях на пороговые значения второстепенных критериев оптимальное решение может быть не найдено. В этом случае необходимо либо изменить эти пороговые значения, либо доработать модель.

Во-вторых, преимуществом пороговой оптимизации является возможность использования неформализуемых (например, социальных) критериев, т.е. для которых невозможно подобрать функциональный параметр для нормирования модели. В этом случае на шаге 5 выполняется дополнительная проверка на соответствие пути под номером  $t$  неформализуемым критериям.

## 2.4. Использование обобщенного критерия

Что касается использования при структурной оптимизации обобщенного критерия, то это не вызывает никаких затруднений. Оптимизационная задача сводится к однокритериальной по параметру  $Ez(X_j)$ , который ставится в соответствие вершинам графа при его нормировании. Данный параметр рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_{\Sigma}(x_i) = \sum_{k=0}^n \xi_k \cdot \alpha_k \cdot \tilde{\varepsilon}^k(x_i), \quad \sum_{k=0}^n \alpha_k = 1, \quad (6)$$

где  $\alpha_k$  - весовые коэффициенты, назначаемые экспертно и определяющие значимость соответствующего критерия среди рассматриваемого множества;  $n$  - количество критериев;

$e^k(x_i)$  - величина параметра, соответствующего  $k$ -му критерию, приведенная к относительному безразмерному виду по формуле

$$\tilde{\varepsilon}^k(x_i) = \varepsilon^k(x_i) / L_{\max}^k; \quad (7) \quad L - \text{максимальная длина среди всех путей графа}$$

по  $k$ -му крите-

ма х

рию;

$\alpha_k = +1$  - коэффициент, принимающий положительное значение, если значение параметра  $e^k$  при оптимизации стремится к минимуму, и отрицательное в противном случае.

Формула (6) не является единственным вариантом конструкции обобщенного критерия. Так, если возникает необходимость повышения чувствительности обобщенного критерия в определенных областях изменения входящих в него параметров, то выражение (6) может быть преобразовано к соответствующему виду (см. подробнее в /6/).

Задача поиска оптимальной структуры технологического процесса в этом случае сводится к решению однокритериальной оптимизационной задачи, т.е. поиску кратчайшего пути на сетевом графе по обобщенному критерию.

## 2.5. Анализ ресурсов действующей технологии и выявление приоритета критериев оптимизации

Системный анализ позволяет определять приоритетность ис-пользуемых при оптимизации критериев.

К основным нормативным показателям уровня технологии относятся приведенные затраты  $C_{\Sigma}$  и суммарное штучное время  $T_{\Sigma}$ , по которым и реализуется выявление ее резервов. Данные показатели, как правило, определяют основные критерии структурной оптимизации технологического процесса.

Методика выявления резервов предусматривает разработку математической модели перспективного технологического процесса (ПТП) в виде сетевого технологического графа, используемого при его структурной оптимизации на уровне маршрутного описания (см. рис.2). Поскольку множество полных путей на данной модели отображает допустимые варианты технологических процессов, то

по-

является возможность получения статистического материала, позволяющего выявить закономерности формирования резервов технологической эффективности.

Для групп технологически однородных деталей в серийном производстве существует функциональное отношение  $Ч' : C_E \rightarrow T_z$ , которое характеризуется обратной зависимостью элементов множеств  $\{T_y\}$  и  $\{C_E\}$ . В качестве такой эмпирической зависимости может использоваться степенная функция вида

$$T_\Sigma = a \cdot C_\Sigma^{-b} \quad (8)$$

где  $a$  и  $b$  - эмпирические коэффициенты.

Анализ такого функционального отношения раскрывает диалектику взаимосвязи параметров  $C_E$  и  $T^\wedge$ : внедрение более производительных методов обработки требует применения более сложного и дорогостоящего оборудования, что сопровождается увеличением приведенных затрат и, наоборот, использование дешевых менее универсальных станков приводит к дифференциации технологического процесса, а следовательно, и к увеличению его станкоемкости.

Для выявления с использованием зависимости (8) вида технико-экономического резерва действующей технологии, определяющего критерий оптимизации ПТП, используются следующие показатели:

$$\chi_c = |dC_\Sigma / dT_\Sigma|_{T_\Sigma = T_d}, \quad \chi_T = |dT_\Sigma / dC_\Sigma|_{C_\Sigma = C_d} \quad (9)$$

или, с учетом (8):

$$\chi_T = b \cdot a \cdot C_d^{-b-1}, \quad \chi_c = \frac{1}{b} \cdot a^{\frac{1}{b}} \cdot T_d^{-\frac{1}{b}-1} \quad (10)$$

где  $C_d$  и  $T_d$  - значения приведенных затрат и суммарного штучного времени для действующего технологического процесса.

Если, то основное внимание при оптимизации

проектируемого ПТП следует уделять повышению его производительности, т.к. эффект от сокращения суммарного штучного времени во много раз превышает вызванное этим возможное ожидаемое увеличение приведенных затрат. Если  $\chi_T > \chi_c$ , то следует

$C$   $T$

денных затрат. Если  $\chi > \chi$ , то следует проектировать более эконо-

$C$   $T$

мичный перспективный технологический процесс. Причем чем больше значение показателя  $\chi$  или  $\chi$ , тем значительнее определяемый

$T$

$C$



им резерв.

Следует заметить, что во время технического перевооружения производства преимущество одного критерия структурной оптимизации ПТП перед другим (например, минимума приведенных затрат перед производительностью) не означает, что это приведет к ухудшению последнего. Дело в том, что функция (8) является характеристикой именно действующего производства и меняет свой вид в результате изменений производства, связанных с техническим перевооружением. Так, сокращение приведенных затрат может не привести к увеличению суммарного штучного времени (рис.3, б) по причине последующей реализации функциональной оптимизации, внедрения более производительных форм организации производственных процессов и т.д.

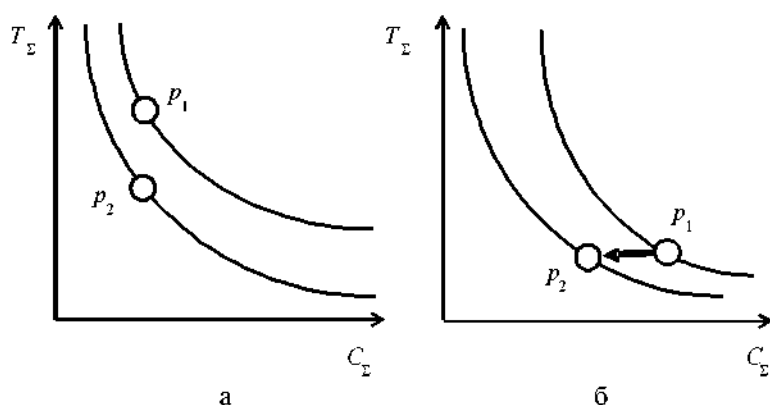


Рис.3. Динамика изменения функционального отношения:

а) при наличии резерва по производительности; б) при наличии резерва по себестоимости;  $p_1$  – точка, соответствующая действующей технологии до технического перевооружения;  $p_2$  – точка, соответствующая действующей технологии после технического перевооружения

Внедрение же более производительного технологического оборудования, в свою очередь, может не привести к росту приведенных затрат за счет повышения значения коэффициента его использования, коэффициента многостаночного обслуживания и др. (рис.3, а).

### 3. Задание на курсовую работу

Исходная информация для выполнения курсовой работы указывается в индивидуальном задании, которое выдается каждому студенту лектором потока или консультантом. Задание определяет объем и содержание всей работы, оформляется на специальном бланке (см. приложение А) и подписывается преподавателем, выдавшим его с указанием даты выдачи.

Основу исходных данных для выполнения курсовой работы составляет

маршрутно-операционное описание действующего технологического процесса изготовления детали-представителя, которое студенты получают в период предшествующей производственной практики. В задании указывается наименование данной детали.

В зависимости от сложности исходного технологического процесса с целью согласования объема выполняемой работы преподаватель-консультант определяет состав и количество критериев оптимизации. С этой же целью он может определить только часть технологического процесса, используемую для структурной оптимизации в рамках курсовой работы.

Задание оговаривает выполнение основных разделов курсовой работы:

- разработку математической модели, включая ее нормирование;
- системный анализ технико-экономических резервов производства и выявление приоритетности критериев оптимизации;
- выполнение структурной оптимизации с выделением главного критерия (пороговая оптимизация) и с использованием обобщенного критерия.

Оговаривается также необходимость использования компьютерных средств как для выполнения оптимизационных расчетов, так и для расчета эмпирических параметров зависимости (8) при аппроксимации статистических данных.

#### **4. Содержание и порядок выполнения работы**

##### **4.1. Пояснительная записка**

Пояснительная записка к курсовой работе должна содержать весь объем материала, определенный в выданном студенту задании, которое также подшивается в пояснительную записку.

Порядок и результат решения каждой задачи излагается в виде отдельного раздела в пояснительной записке, который включает поясняющую текстовую часть с необходимыми математическими выкладками, иллюстрациями, распечатками ЭВМ и графическую часть<sup>1</sup>.

Рекомендуется следующее содержание разделов пояснительной записки.

Введение

1. Математическая модель

1.1. Структурный анализ технологического процесса и построение модели  
1.2. Нормирование модели по критериям оптимизации

2. Анализ технико-экономических резервов производства и выявление приоритетности критериев оптимизации

3. Оптимизационные расчеты на ЭВМ 3.1. Пороговая оптимизация

3.2. Использование обобщенного критерия оптимизации

Выводы

Список литературы

Приложение А. Таблица исходных данных статистического анализа

Приложение Б. Распечатка файла исходных данных для расчетов на ПЭВМ при пороговой оптимизации

Приложение В. Распечатка файла результатов расчета на ПЭВМ при пороговой оптимизации

Графические части всех разделов допускается объединять в отдельный альбом.

Приложение Г. Распечатки файлов результатов расчета критериев на максимум для построения обобщенного критерия оптимизации

Приложение Д. Распечатка файла исходных данных для оптимизационных расчетов по обобщенному критерию

Приложение Е. Распечатка файла результатов оптимизационного расчета на ПЭВМ по обобщенному критерию

Оформление курсовой работы выполняется в соответствии с нормативными документами /10–11/ и дополнительными требованиями / 12, раздел 5/.

## **4.2. Построение математической модели**

Математическая модель строится в виде чертежа (образец см. в приложении Б). Для каждой изображаемой вершины графа заносится следующая информация: номер вершины, номера операций базового технологического процесса, модель технологического оборудования (станка), наименование или код операции, значения параметров критериев оптимизации, включая обобщенный критерий. Если данная информация не помещается в пределах изображения вершины графа, то допускается ее частичное кодирование (модели оборудования и наименования операции) с дополнительным размещением на поле чертежа таблицы расшифровки используемых обозначений.

Математическая модель строится на основе элементарного графа, представляющего собой цепочку вершин, отображающих операции действующего технологического процесса, определенного в задании (см. базовый путь на рис.1), с возможной дифференциацией отдельных его операций. Так, дифференциация операции 20 примера, изображенного на рис.4, а, приводит к включению вместо нее в базовый путь операций 21 и 22 (см. рис. 4, б). Это позволяет при построении модели рассмотреть вариант выполнения перехода 3 в операции 25 за счет концентрации операций 22 и 25 базовой цепочки.

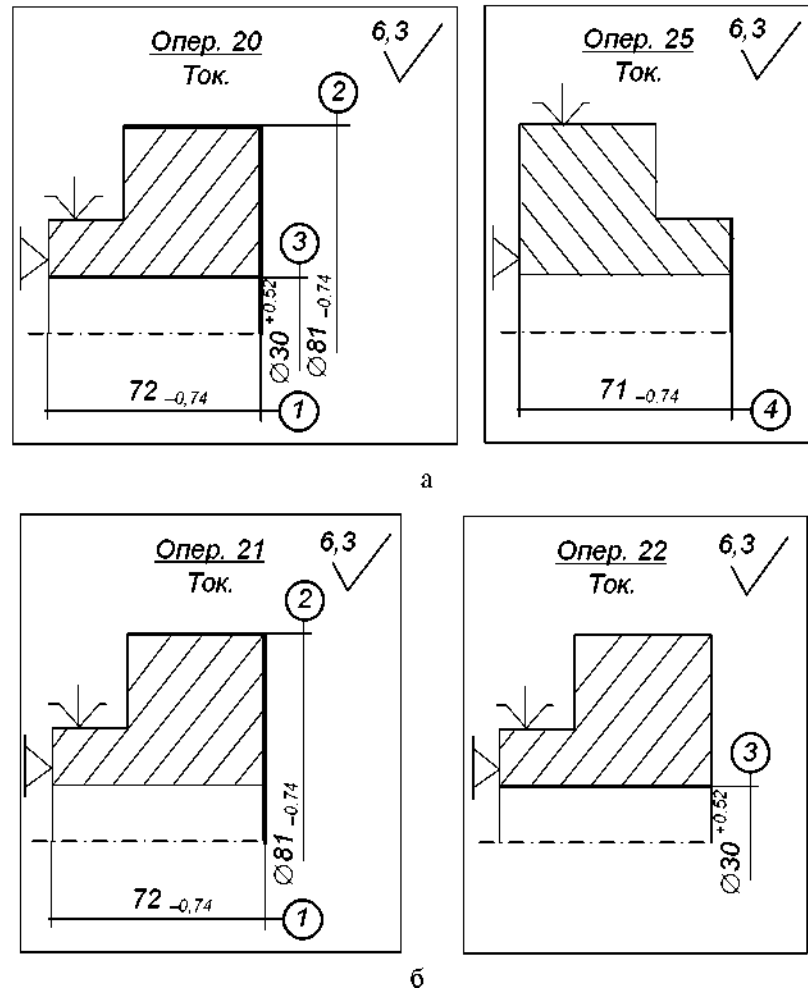


Рис. 4. Пример дифференциации базового технологическо-го процесса: а – фрагмент описания исходного технологического процесса; б – результат дифференциации двадцатой операции

Дальнейшее формирование остальных вершин математической модели осуществляется с помощью анализа базового варианта техно-логического процесса с учетом определенных в разд. 2 условий и фак-торов возможных многовариантных структурных технологических реш-ений.

Вершина входа сети отображает операцию получения исходной заготовки<sup>1</sup>, а вершина выхода – операцию окончательного контроля уже готовой детали<sup>2</sup>.

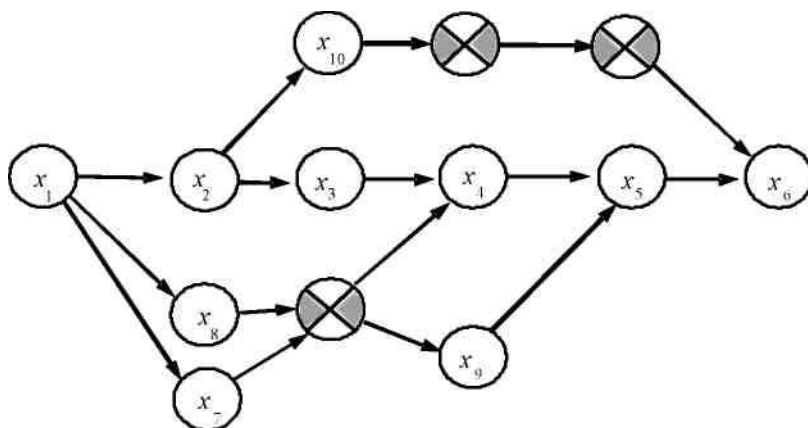


Рис.5

Для того чтобы определяемые моделью варианты технологиче-ских процессов имели одинаковую длину (количество вершин в пути), сетевой граф строится с отношением строгого порядка (см в /7/, с.20), разбитым на слои так, что:

- а) любая дуга соединяет вершины только соседних слоев;
- б) в первом и последнем слоях имеется по одному элементу (вершины входа и выхода из сети);
- в) вершины одного слоя не соединены между собой дугами.

<sup>1</sup> Если таких вариантов несколько, то в качестве вершины входа используется фиктивная вершина, предшествующая заготовительной операции.

<sup>2</sup> Так как значения критериальных параметров вершин входа и выхода сети не влияют на результат оптимизации, то при нормировании модели их можно взять нулевыми.

Такая конфигурация модели получается несложно путем введения фиктивных вершин. Получение законченной модели для примера, изображенного на рис. 2, показано на рис.5.

При построении модели следует обращать внимание на то, что любой полный путь на сетевом графе должен однозначно отображать все множество технологических переходов, содержащихся в базовом технологическом процессе, то есть не должно быть их избыточности (повторений) или недостаточности (отсутствия тех или иных).

### 4.3. Нормирование модели

Нормирование модели, как было отмечено в разд.2, подразумевает постановку в соответствие каждой вершине графа  $x_i \in X$  вещест-

венных чисел  $\{\varepsilon^k(x_i)\}$  , представляющих из себя значение выходных функциональных параметров, соответствующих используемым критериям оптимизации (см. табл. 2).

Таблица 2

Пример соответствия критериев оптимизации функциональным параметрам технологического процесса

Наименование критерия оптимизации	Наименование функционального параметра
Максимальная	Штучно
Минимум приведенных затрат	Приведенные затраты на выполнение
Минимальное	Количество
Минимальная	Площадь,

$k$  – номер критерия оптимизации

Рассмотрим подробнее методику расчета вышеназванных функциональных параметров.

**Штучно-калькуляционное время.** Расчет шт учно-калькуляционного времени на операцию, соответствующую каждой вершине графа,

$$\varepsilon^1(x_i) = t_{\text{шт}}(x_i) \quad (11)$$

осуществляется в курсовой работе с использованием общемашиностроительных нормативов по расчету режимов резания и норм времени /13-16/.

При использовании данного параметра соответствующая ему длина искомого пути будет равна станкочасности оптимального технологического процесса.

**Приведенные затраты.** Приведенные затраты на выполнение технологической операции, соответствующей вершине графа  $x_i$ , осуществляется по формуле

$$\varepsilon^2(x_i) = \frac{Z(x_i) \cdot t_{\text{шт}}(x_i)}{60} \quad (12)$$

где  $t_{\text{шт}}(x_i)$  – шт учно-калькуляционное время выполнения операции, мин;

$Z(x_i)$  – часовые приведенные затраты, связанные с работой технологического оборудования, используемого на той же операции, в течение одного часа, руб/час<sup>1</sup>.

При использовании данного параметра соответствующая ему длина искомого пути будет равна приведенным затратам на внедрение оптимального технологического процесса при изготовлении одной детали. Для того чтобы оценить общие приведенные затраты, связанные с реализацией всего проекта, необходимо значение (12) умножить на величину годовой программы выпуска данных деталей.

**Количество станков.** Количество станков на операции, соответствующей вершине  $x_i$ , можно рассчитать по формуле

<sup>1</sup> Подробные формулы для расчета величин часовых приведенных затрат, а также содержащие их таблицы для наиболее часто используемых станков приведены в /17/.

$$\varepsilon^3(x_i) = \frac{N \cdot t_{\text{шт}}(x_i)}{60 \cdot F(x_i) \cdot \eta_3} \quad (13)$$

где  $N$  – годовая программа выпуска данных деталей<sup>1</sup>, шт ;

$F(x_i)$  – годовой фонд времени работы технологического оборудования (см. значения в /18/, приложение 1 на стр.218), используемого на операции, соответствующей вершине  $x_i$ , н-час;

$\eta$  – нормативный коэффициент загрузки оборудования (для се-

3

рийного производства  $\eta = 0,85$ ).

3

Поскольку при суммировании в выражении (3) постоянные ко-эффициенты из (13) выносятся за знак суммы и образуют неизменный множитель для каждого пути графа, не влияющий на результат сравнения их длин при оптимизации, то выражение (13) может быть упрощено приведением к виду

$$\varepsilon^3(x_i) = t_{\text{шт}}(x_i) / F(x_i) . \quad (14)$$

Однако следует иметь ввиду, что в этом случае длина искомого оптимального пути не будет равна требуемому количеству станков.

**Занимаемая площадь.** Площадь, занимаемая станками на технологической операции, соответствующей вершине графа  $x_i$ , рассчитывается по формуле

$$\varepsilon^2(x_i) = \frac{S(x_i) \cdot N \cdot t_{\text{шт}}(x_i)}{60 \cdot F(x_i) \cdot \eta_3}$$

где  $S(x_i)$  – норматив площади, занимаемой технологическим оборудованием на операции, соответствующей вершине  $x_i$ , м<sup>2</sup>.

При использовании данного параметра соответствующая ему длина искомого пути будет равна минимально необходимому количеству единиц технологического оборудования. Реальное же значение будет большим, т.к. окончательный проектный расчет ведется отдельно по видам станков с последующим округлением в большую сторону.

Другие критерии оптимизации технологических процессов (качества, надежности и др.) и соответствующие им функциональные па-

<sup>1</sup> Это может быть приведенная программа к детали-представителю параметры, кроме рассмотренных и используемых в курсовой работе, изучаются в дисциплине «Основы технологии машиностроения».

В пояснительной записке при оформлении подраздела, посвященного нормированию модели, обязательно указываются

1) ссылки на использованные литературные источники и нормативные материалы,

2) использованные формулы для расчета режимов резания по каждому виду обработки и каждой категории технологического оборудования (отдельно для станков с ЧПУ, станков полуавтоматов, универсальных и др.),

3) значения эмпирических поправочных коэффициентов и показателей степеней, используемых в формулах п. 2,

4) нормативные значения составляющих вспомогательного на операцию и



подготовительно-заключительного времени.

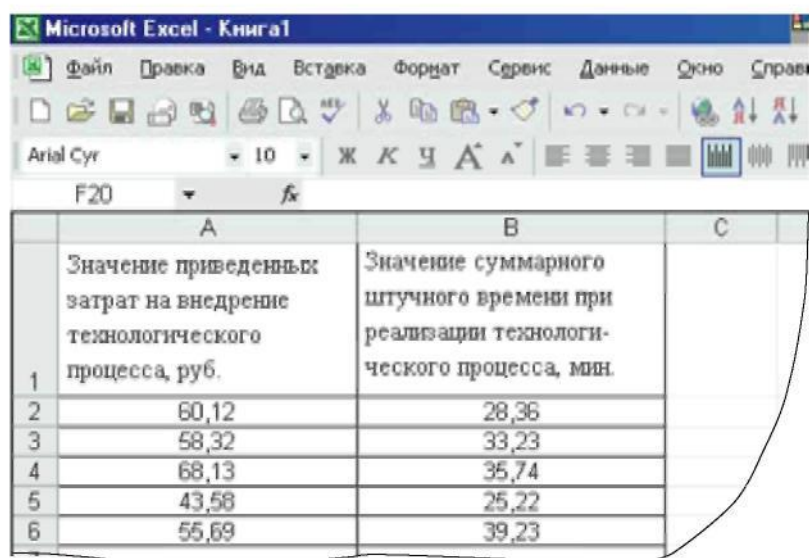
Результаты нормирования модели оформляются в виде таблицы.

Таблица 3 Исходные данные и результаты нормирования модели

Номер вершины графа	Номер технологического перехода	Подача, мм/мин	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	Ход инструмента, мм	Время, мин				Часовые приведенные затраты, руб/ч	Приведенные затраты, руб
						основное	вспомогательное	подготовительно-заключительное	штучно-калькуляционное		
2	1	100	60,4	0,5	50	0,5	0,2			1,00	0,031
	2	100	80,0	0,1	50	0,5	0,1				
	Итого					1,0	0,6	15	1,83		
3	1	150	75	0,5	60	0,4	0,3	8	0,92	1,25	0,019

#### 4.4. Анализ технико-экономических резервов производства и выявление приоритетности критериев оптимизации

В соответствии с методикой выявления резервов по основным нормативным показателям уровня технологии, изложенной в пп. 2.5, построенная и пронормированная математическая модель просчитывается на предмет поиска значений длин всех путей графа по параметрам приведенных затрат и штучного времени. Для этого используется специальная программа для ПЭВМ «Network». Исходные данные для расчета готовятся в виде текстового файла «infile.txt»<sup>1</sup> по методике, изложенной в /19/, и размещаемого в той же папке, где и исполняемый модуль программы «Network».



	А	В	С
1	Значение приведенных затрат на внедрение технологического процесса, руб.	Значение суммарного штучного времени при реализации технологического процесса, мин.	
2	60,12	28,36	
3	58,32	33,23	
4	68,13	35,74	
5	43,58	25,22	
6	55,69	39,23	

Рис.6

<sup>1</sup> Так как распознавание файла программой осуществляется по данному имени, то использование другого имени не допускается

Результаты расчета оформляются в виде таблицы приложения «Microsoft Excel» (см. пример на рис.6), которая приводится в приложении А пояснительной записки (см. содержание в пп.4.1). При этом с целью более компактного представления ее форма в пояснительной записке может отличаться от представления в окне «Microsoft Excel».

Полученные статистические данные аппроксимируются далее степенной функцией (8), для которой рассчитываются эмпирические коэффициенты  $a$  и  $b$ . Расчеты выполняются с использованием пакета анализа приложения «Microsoft Excel» по методике /20/. При этом параллельно выполняется построение графика искомой функции (см. пример на рис.7).

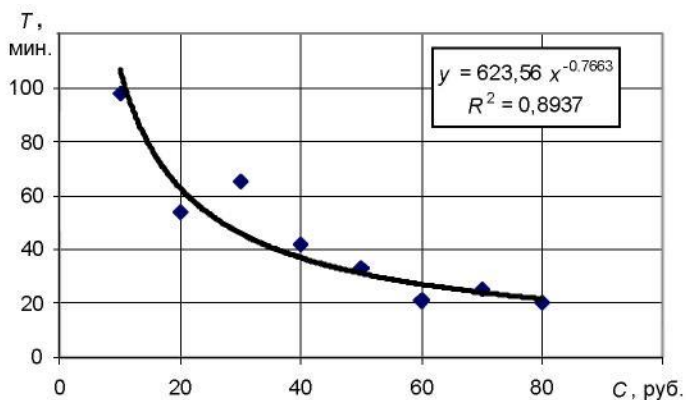


Рис.7

При выявлении эмпирической зависимости приведенных затрат и штучного времени возможно появление статистических точек, не вписывающихся в искомую закономерность в силу тех или иных причин. В этом случае их следует удалить из таблицы статистических данных, что автоматически отобразится на графическом изображении зависимости, а также на результатах расчета.

Графическое представление функциональной зависимости (8) (см. пример на рис.7) приводится в пояснительной записке в макси-

мально возможном масштабе. Чтобы не снижать читабельность графика допускается указывать не все эмпирические точки. Обязательным является указание на поле графика уравнения функциональной зависимости, критерия адекватности, значений  $C_d$  и  $T_d$ .

## 4.5. Оптимизационные расчеты

В пояснительной записке поиск оптимальной структуры техно-логического процесса с использованием пороговой оптимизации и обобщенного критерия излагается в отдельных соответствующих подразделах (см. содержание в пп.4.1).

### 4.5.1. Пороговая оптимизация

Описание теоретических положений и основных шагов, реализуемых при выполнении пороговой оптимизации, приведено в пп.2.3.

В качестве главного назначается более приоритетный критерий, выявленный в пп.4.4.

Пороговые значения для второстепенных критериев назначаются преподавателем-консультантом.

Исходные данные для оптимизационных расчетов на ПЭВМ готовятся в виде

текстового файла по методике, изложенной в /19/, и приводятся в приложении Б пояснительной записки (см. содержание в пп.4.1).

При выполнении расчетов на ПЭВМ с помощью программы «АМАСОНТ» /19/ реализуется поиск упорядоченного множества путей графа  $S_D = \{ L_t \}$  по главному критерию. Результаты расчетов приводятся в приложении В пояснительной записки (см. содержание в пп.4.1).

Далее приводится сценарий реализации шагов пороговой оптимизации, описанных в пп.2.3. По завершению оптимизационного поиска в пояснительной записке указывается путь графа, отображающий оптимальную структуру технологического процесса, с указанием значений критериальных функциональных параметров.

#### **4.5.2. Использование обобщенного критерия оптимизации**

Описание теоретических положений выполнения оптимизации с использованием обобщенного критерия, приведено в пп.2.4.

Для выполнения расчетов значений обобщенного критерия в вершинах графа по формулам (6) и (7), выполняется поиск максималь-

ных длин путей  $L_{max}^k$  по всем критериям. Для этого в исходных данных, использованных для расчетов при пороговой оптимизации, значения критериальных параметров в вершинах заменяются на отрицательные. Далее выполняется расчет на ПЭВМ с помощью программы «АМАСОНТ» последовательно по каждому критерию. При этом

значения  $L_{max}^k$  соответствуют первому пути упорядоченного множества при расчете по соответствующему критерию. Распечатки файлов результатов расчета критериев на максимум для построения обобщенного критерия оптимизации приводятся в приложении Г пояснительной записки (см. содержание в пп.4.1).

Рассчитанные значения обобщенного критерия по формуле (6) приводятся в пояснительной записке в виде таблицы, а также указываются непосредственно на графическом изображении самих вершин на чертеже модели. В пояснительной записке дается подробное обоснование назначенных значений весовых коэффициентов  $\alpha_k$ .

Далее готовится файл исходных данных для оптимизационных расчетов по обобщенному критерию, распечатка которого приводится в приложении Д пояснительной записки (см. содержание в пп.4.1). Данный файл получается из файла, использованного при пороговой оптимизации. Для этого в раздел описания вершин графа добавляются рассчитанные значения обобщенного критерия.

Оптимизационный расчет выполняется на ПЭВМ с помощью программы «АМАСОНТ» с указанием на обобщенный критерий. Распечатка файла

результатов данного расчета приводится в приложении Е пояснительной записки (см. содержание в пп.4.1). Оптимальную структуру технологического процесса отображает первый путь найденного упорядоченного множества, который приводится в пояснительной записке с указанием значений всех критериальных функциональных параметров.

#### **4.6. Выводы**

В выводах к работе следует раскрыть степень достижения цели оптимизации структуры технологического процесса во взаимосвязи с противоречивостью использованных критериев оптимизации.

Необходимо проанализировать результаты пороговой оптимизации в сравнении с использованием обобщенного критерия.

Путем сравнения оптимальной структуры с действующей следует оценить экономический, социальный и др. эффекты, полученные в результате оптимизации.

### **5. Графическая часть**

Графическая часть должна содержать следующие обязательные компоненты:

- эскиз детали<sup>1</sup>;
- маршрутно-операционное описание исходного технологического процесса;
- операционные эскизы вновь введенных по результатам оптимизации технологических операций;
- математическая модель.

Эскиз детали носит информационный характер и используется студентом во время доклада при защите курсовой работы. Выполняется с рабочего чертежа детали без конструкторской проработки. Подписи в угловом штампе не проставляются.

Маршрутно-операционное описание исходного технологического процесса выполняется на формате А1 с оформлением операционных эскизов согласно требований стандартов системы ЕСТД, на которых обязательно

- проставляется номер, наименование и код операции, модель технологического оборудования;
- отмечаются утолщенной линией обрабатываемые поверхности;
- проставляются операционные размеры (номинальное значение и предельные отклонения);

Допускается заменять ксерокопией рабочего чертежа

- указываются поверхности, используемые для базирования (технологические установочные базы);
- проставляется значение параметра шероховатости обрабатываемых поверхностей.

Операционные эскизы вновь введенных по результатам оптимизации технологических операций допускается изображать на листе маршрутно-операционного описания исходного технологического процесса согласно тем же требованиям. Единственно, вместо номера операции проставляется номер вершины графа, отображающего данную операцию.

Математическая модель оформляется в виде схемы на формате А1 согласно требованиям стандартов системы ЕСКД (см. пример в приложении Б).

Над угловым штампом приводятся условные обозначения, которые в обязательном порядке должны содержать составляющую информацию вершин графа и пример изображения дуг оптимального пути.

В изображении вершин графа в обязательном порядке должна содержаться следующая информация:

- номер вершины;
- номера операций базового технологического процесса, положенных в основу построения данной операции;
- значения всех критериальных параметров;
- значение обобщенного критерия оптимизации;
- модель технологического оборудования;
- вид операции.

В случае затруднений в размещении всей информации в области изображения вершины допускается выполнять кодировку данных об оборудовании. В этом случае в условных обозначениях приводится таблица или перечень кодов станков (например, 1 – 16К20; 2 – 16К20Ф3 и т.д.), которые и проставляются в вершинах графа.

## Список литературы

1. *Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П.* Введение в системный анализ.– М.: Высшая школа, 1989.– 367 с.
2. *Николаев В.И., Брук В.М.* Системотехника: методы и приложения.– Л.: Машиностроение, 1985.–199 с.
3. *Анферов М.А.* Моделирование и оптимизация структуры технологических процессов.– Уфа: УГАТУ, 1998.– 85 с.
4. ГОСТ 3.1109-82. ЕСТД. Термины и определения основных понятий.– М. : Изд-во стандартов, 1985.– 18 с.
5. *Колесов И. М.* Основы технологии машиностроения.– М.: Высшая школа, 1999.– 591 с.
6. *Анфёров М.А., Селиванов С.Г.* Структурная оптимизация технологических процессов в машиностроении.– Уфа: Гилем, 1996.– 185 с.
7. *Кофман А., Дебазей Г.* Сетевые методы планирования.– М.: Прогресс, 1968.–182 с.
8. *Анферов М.А.* К вопросу математического обеспечения структурной оптимизации технологических процессов в гибких производственных системах// Автоматизация технологических процессов и производств.– Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1988.– С. 16 – 25.
9. *Shier D.R.* Iterative Methods for Determining the  $k$  Shortest Paths in a Network.– Network.– 1976.– № 6.– P.205 – 230.
10. ГОСТ 2.105-95. ЕСКД. Общие требования к текстовым документам.– М.: Изд-во стандартов, 1995.– 30 с.
11. СТП УГАТУ 02-98. Графические и текстовые конструкторские документы. Требования к построению, изложению, оформлению.– Уфа: УГАТУ, 1998.– 82 с.
12. *Селиванов С.Г., Касимов Р.Г.* Организация выполнения дипломной работы и курсовых проектов (работ) студентами бакалавриата по направлению Т-29 – Технология, оборудование и автоматизация машиностроительного производства: Методические рекомендации.– Уфа: УГАТУ, 1995.– 48 с.
13. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Ч.1: Нормативы времени.– М.: Экономика, 1990.– 208 с.
14. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Ч.2: Нормативы режимов резания.– М.: Экономика, 1990.– 474 с.
15. Общемашиностроительные нормативы времени вспомогательного на

обслуживание рабочего места и подготовительно-заключительного для технического нормирования станочных работ.– М.: Машиностроение, 1964.– 396 с.

16.Общемашиностроительные укрупненные нормативы времени на работы, выполняемые на токарно-револьверных станках.– М.: Экономика, 1989.– 152 с.

17.Расчеты экономической эффективности новой техники: Справочник /Под общ. ред. К.М.Великанова.– 2-е изд.– Л.: Машиностроение, 1990.– 448 с.

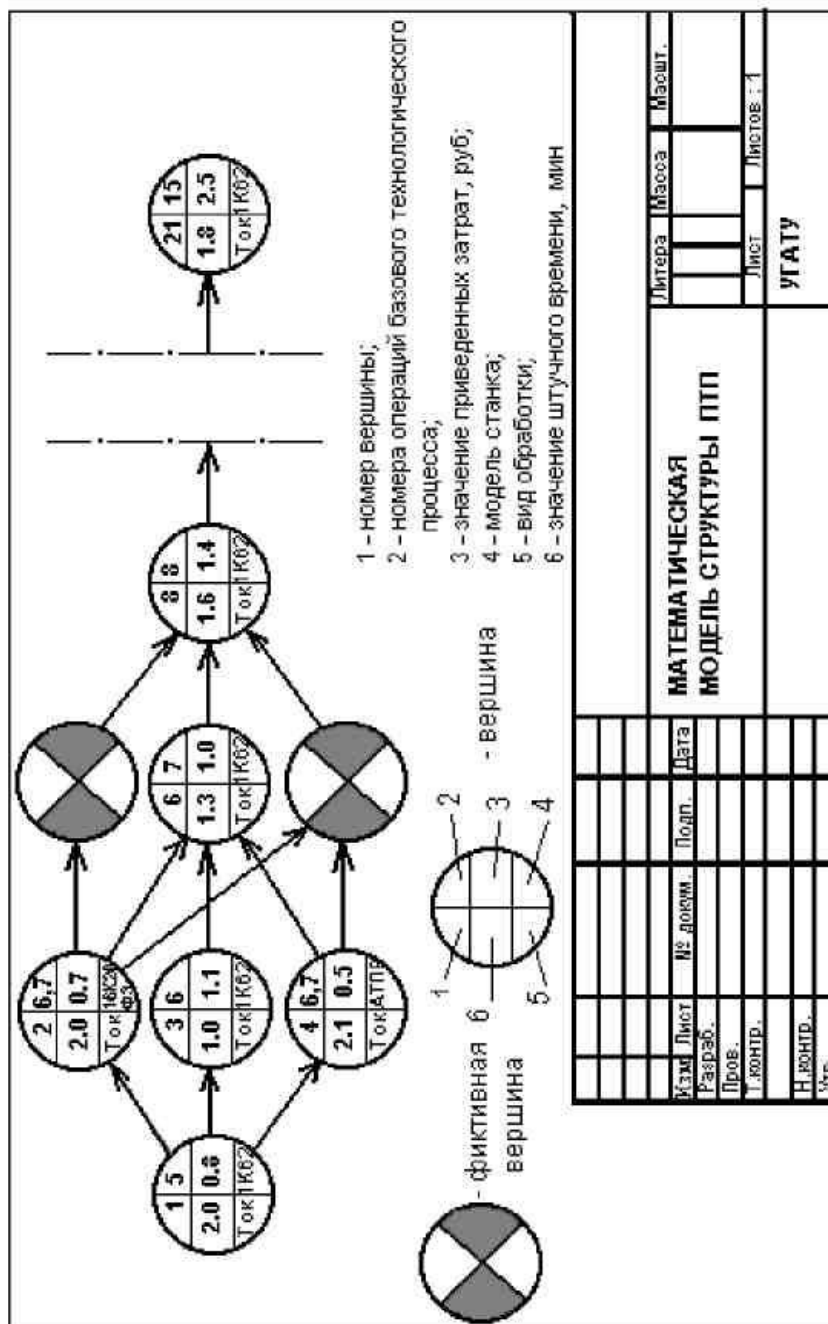
18.Проектирование технологических процессов механической обработки в машиностроении: Учебное пособие /Под ред. В.В.Бабука.– Минск: Высшая школа, 1987.– 255 с.

19.*Анфёров М.А.* Методические указания по использованию программы «АМАСОНТ» при структурной оптимизации технологических процессов в курсовом и дипломном проектировании.– Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2002.– 28 с.

20.*Анфёров М.А., Шехтман С.Р.* Методические указания по использованию программной среды «Microsoft Excel» для расчета эмпирических моделей в курсовом и дипломном проектировании.– Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2003.– 26с.



Приложение Б  
 Пример оформления математической модели



Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разр.	Пров.	Т. контр.	Н. контр.	Утв.
<b>МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРУКТУРЫ ПТП</b>				
Литера	Масса	Масшт.	Лист	Листов : 1
<b>УГАТУ</b>				

